

# Düzensiz Darbe Tekrarlama Aralıklı MTI Süzgeçlerinin Min-Max Tasarımı Min-Max Design of MTI Filters with Non-uniform Pulse Repetition Intervals

Mehmet İspir  
İLTAREN  
TÜBİTAK BİLGEM  
Ankara, Türkiye  
Email: mehmet.ispir@tubitak.gov.tr

Çağatay Candan  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: ccandan@metu.edu.tr

**Özetçe** —Bu çalışmada düzensiz aralıklı MTI radar sistemleri için min-max yaklaşımı kullanılarak oluşturulmuş süzgeç tasarımı sunulmaktadır. İlgili tasarım en iyilenmiş süzgecin MTI iyileştirme faktörüne en yakın iyileştirme faktörünü elde etmek için oluşturulmuştur. Tasarım performansı, benzetimlerle birlikte incelenmiş ve literatürdeki düzensiz MTI süzgeç tasarımları ile performans karşılaştırması verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—MTI Radar, Düzensiz DTF, Düzensiz Süzgeçleme, Kargaşa Bastırımı, Kör Hız

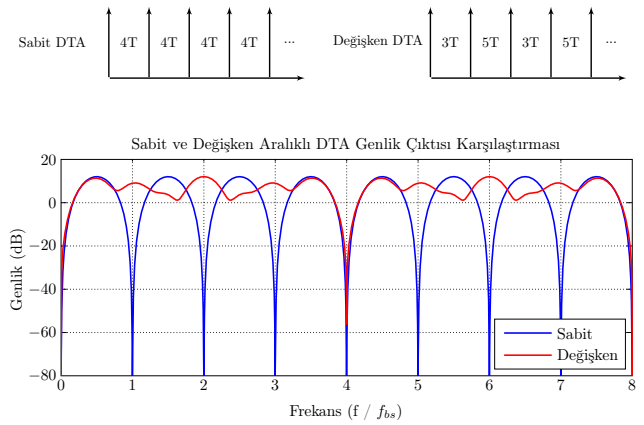
**Abstract**—In this work, design of non-uniform MTI filter for staggered MTI Radar systems is presented in the sense of min-max filter design. Corresponding design is studied to obtain the nearest improvement factor to the optimum MTI filter improvement factor. The performance of the design is examined with simulations and a detailed comparison with the non-uniform MTI filters in the literature is given.

**Keywords**—MTI Radar, Non-uniform PRF, Non-uniform Filtering, Clutter Suppression, Blind Speed.

## I. GİRİŞ

MTI (Moving Target Indication) radar sistemleri yoğun kargaşa ortamında hareketli hedeflerin algılanması için kullanılmaktadır. Bu sistemler hareketli hedeflerin oluşturduğu Doppler kaymasını kullanarak, yüksek geçirgen süzgeçler yardımı ile hareketli hedef yankısının kargaşa yankısından ayırmasını sağlamaktadır. Sabit darbe tekrarlama aralığı kullanan MTI radar sistemlerinde, düzgün örneklemeden dolayı, darbe tekrarlama frekansı ve tamsayı katı olan frekanslarda Doppler kayması oluşturan hareketli hedefler, kargaşa ile birlikte bastırılmaktadır. Dolayısıyla bu hızlarda hareket eden hedefler radar tarafından algılanamamaktadır. Algılanamayan bu hız değerleri *kör hız*'lar olarak isimlendirilmektedir [1].

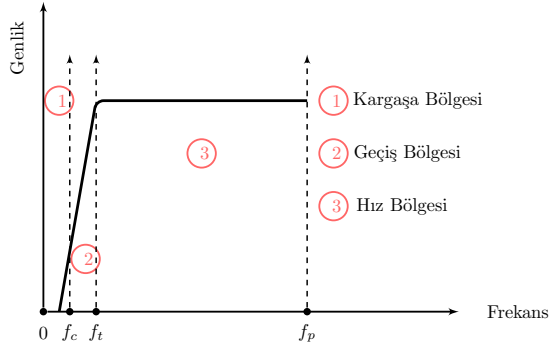
Kör hız probleminin çözümü için kullanılan metotlardan bir tanesi de sabit darbe tekrarlama aralığı yerine değişken darbe tekrarlama aralığı kullanımıdır [2]. Bu metot ile ilk kör hız değeri artırılarak daha geniş bir Doppler frekans aralığında hareketli hedeflerin algılanması sağlanır. Şekil 1'de sabit ve değişken darbe tekrarlama aralıklı sistemler için kör hız karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 1. Sabit ve Değişken Aralıklı MTI Süzgeç Çıktısı Karşılaştırması

$3T$  ve  $5T$  değişken darbe tekrarlama aralıklarının kullanımı ile ilk kör hız değeri  $4T$  sabit aralıklı bir sisteme göre 4 kat artırılmıştır. Fakat değişken darbe tekrarlama aralığı kullanımı ile oluşan düzensiz örnekleme sebebiyle geçirgen kuşakta salınımlar oluşmuştur. Bu salınımların büyüklüğünün artması belirli Doppler frekanslarındaki hareketli hedeflerin tespit olasılığını düşürmektedir. Tanımlanan Doppler frekans aralığında eşit olasılıklı hareketli hedef tespiti için bu salınım değerlerinin en küçük olması gerekmektedir. Başka bir deyişle değişken darbe tekrarlama aralığı kullanılan MTI süzgeçlerinin Şekil 2'deki gibi düz bir geçirgen kuşak çıkıtısına sahip olması gerekmektedir. Bu süzgeçler aynı zamanda istenen kargaşa bastırımını da sağlamalıdır.

Yeterli kargaşa bastırımı sağlayarak düz bir geçirgen kuşak çıkıtısı elde etmek için süzgeç katsayılarının ve darbe tekrarlama aralıklarının en iyilenmesi gerekmektedir. Bu en iyilemelerin yapılması için Doppler tayfı Şekil 2'deki gibi bölgelere ayrılmıştır [3]. *Kargaşa Bölgesi* kargaşa sinyalinin bulunduğu ve  $f_c$  limit frekansı ile sınırlanan bölgedir. *Hız Bölgesi* ilgilenilen hareketli hedefler için Doppler frekans kuşağını göstermektedir. *Geçiş Bölgesi* ise süzgecin dikliğini gösteren ve diğer iki bölge arasında bulunan alandır.



Şekil 2. Düzensiz MTI Süzgeçleri için İstenen Frekans Yanıtı

Düzensiz MTI süzgecinin tasarım amaçları *Kargaşa Bölgesi* ve *Hız Bölgesi* için aşağıdaki şekilde listelenebilir:

- Hız bölgesinde geçirme kuşağı salınımlarını azaltmak
- Kargaşa bölgesinde durdurma kuşağı bastırımını artırmak

Bu amaçlara göre literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır [4], [5], [6], [7], [8]. Bu çalışmalar yukarıda anlatılan iki parametre setinin ayrı ayrı ya da birlikte en iyilemesi üzerine odaklanmaktadır. Prinsen [4] Taylor açılımı kullanarak durdurucu kuşakta düz bir çıktı amacıyla tasarım yapmıştır. Bu tasarım düzgün aralıklı MTI süzgeçlerinde kullanılan *Binom* MTI süzgecinin düzensiz aralıklı MTI süzgeçleri için karşılığı olarak düşünülebilir. Hsiao [6] kargaşa bastırımına ek olarak geçirgen banttaki salınımların da en küçük olmasını gözönünde bulunduran bir tasarım sunmaktadır. Durdurucu kuşakta kargaşa bastırımı için süzgeç katsayıları en iyilenmiş, ve geçirgen banttaki salınımların azaltılması için de uygun darbe tekrarlar aralıkları seçilmiştir. Jacomini [7] ise süzgeç katsayılarını ve darbe tekrarlar aralıklarını birlikte en iyilemiş ve ağırlık katsayısı ile iki değişken arasında ilişki kurmuştur. Zuyin [8] ise belirli darbe tekrarlar aralıkları için süzgeç tasarımı gerçekleştirmiştir.

Yukarıda belirtilen çalışmalar süzgeçlerin frekans yanıtına göre karşılaştırılmıştır. Bundan farklı olarak MTI süzgeç performanslarının karşılaştırılması için iyileştirme faktörü, MTI kazancı, kargaşa bastırımı gibi farklı ölçütler de kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan ölçüt MTI iyileştirme faktörüdür. Bu değer MTI süzgeç çıkışındaki sinyal-kargaşa güç oranının süzgeç girişindeki sinyal-kargaşa güç oranına bölünmesi ve ilgililenen hız değerleri için ortalamasının alınmasıyla oluşturulmaktadır [9]. Bu değer için süzgeç katsayı vektörü ( $\mathbf{w}$ ) ile sinyal ( $\mathbf{R}_s$ ) ve kargaşa kovaryans matrisleri ( $\mathbf{R}_c$ ) kullanılarak hesaplaması eşitlik (1)'de verilmiştir.

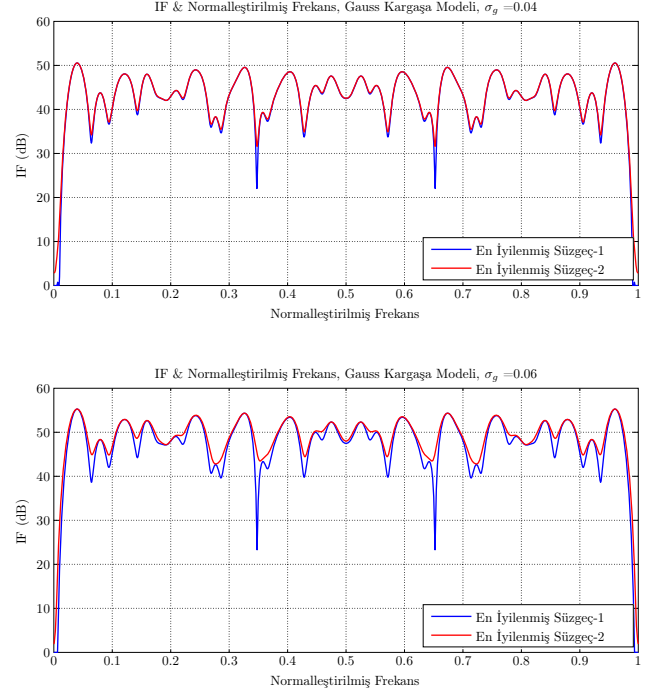
$$IF = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_c \mathbf{w}} \quad (1)$$

Literatürde yüksek iyileştirme faktörü elde etmek amacıyla kargaşa kovaryans matrisi kullanılarak iki farklı en iyilenmiş MTI süzgeci tasarlanmıştır. Hsiao [10] çalışmasında en büyük kargaşa bastırımını gözönünde bulundurmuş ve kargaşa kovaryans matrisinin en küçük özdeğerine karşılık gelen özvektörün elemanlarını süzgeç katsayısı olarak kullanmıştır.

Diğer en iyilenmiş süzgeç ise, uyumlu süzgeç konseptine dayanmaktadır. Süzgeç katsayıları, iletilen her bir darbe sinyali ile alınacak yankı sinyalinin uyumlu olması şeklinde tasarlanmaktadır. İlgili eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{s} \quad (2)$$

Burada  $\mathbf{w}_{opt}$  süzgeç katsayı vektörü,  $\mathbf{R}_c^{-1}$  kargaşa kovaryans matrisinin tersi ve  $\mathbf{s}$  ise sinyal vektörünü belirtmektedir. İki en iyilenmiş süzgecin MTI iyileştirme faktörü değerleri, Gauss güç tayfı yoğunluğu kargaşa modelinin farklı frekans yayılım değerleri için Şekil 3'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. En İyilenmiş Süzgeçlerin Farklı Kargaşa Değerlerine göre Karşılaştırılması

Şekil 3'de *En İyilenmiş Süzgeç-1* ve *En İyilenmiş Süzgeç-2* sırasıyla öz ve uyumlu tip en iyilenmiş süzgeçlerin iyileştirme faktörü değerlerini göstermektedir. *En İyilenmiş Süzgeç-1* sadece kargaşa bastırımını gözönünde bulundurduğu için geçirgen kuşakta derin salınımlar oluşabilmektedir. *En İyilenmiş Süzgeç-2*, karşılaştırılan iki durum için de en büyük MTI iyileştirme faktörünü sağlamaktadır. Bunun sebebi hem kargaşa hem de sinyal bileşenleri kullanılarak her bir frekans için en iyilenmiş süzgeç tasarlanmasıdır.

Bu çalışmadaki amacımız ise min-max tekniği kullanarak, *En İyilenmiş Süzgeç-2*'nin iyileştirme faktörüne en yakın iyileştirme faktörünü veren tek süzgeç tasarımıdır. Bu amaçla oluşturulan tasarımın detayları ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması sonraki bölümlerde sunulmaktadır. Daha kapsamlı karşılaştırmalar için [11]'e bakılabilir.

## II. MIN-MAX ÖZYİNESİZ SÜZGEÇ TASARIMI

Min-max süzgeç tasarımı en iyilenmiş süzgece en yakın iyileştirme faktörünü elde etmek için aradaki en büyük farkı

küçültmeye çalışmaktadır. Bu şekilde geçirgen kuşakta düz bir çıktı elde edilerek en iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörüne en yakın değer elde edilmeye çalışılmaktadır.

İlgili en iyileme denklemi eşitlik (3)'te verilmiştir.

$$\min_{w_d, f} (I_{opt} - I_d) = \min_{w_d, f} \left( \frac{\mathbf{w}_{opt}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}_{opt}}{\mathbf{w}_{opt}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}_{opt}} - \frac{\mathbf{w}_d^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}_d}{\mathbf{w}_d^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}_d} \right) \quad (3)$$

Burada,

- $\mathbf{I}_{opt}$  : En iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörü
- $\mathbf{I}_d$  : Min-max süzgecin iyileştirme faktörü
- $\mathbf{w}_{opt}$  : En iyilenmiş süzgecin katsayı vektörü
- $\mathbf{w}_d$  : Min-max süzgecin katsayı vektörü
- $\mathbf{R}_x$  : Girişim kovaryans matrisi  
( $\mathbf{R}_x = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_n = \mathbf{R}_c + \sigma_n^2 \mathbf{I}$ )
- $\mathbf{R}_s$  : Sinyal kovaryans matrisi  
( $\mathbf{R}_s = \mathbf{E}\{s(\theta)s^H(\theta)\}$ )

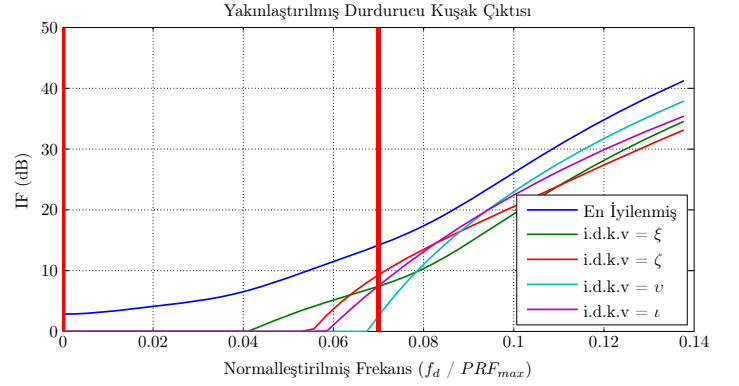
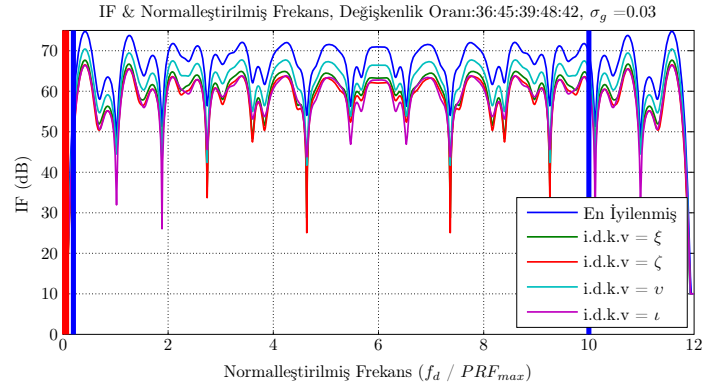
Min-max süzgeç tasarım problemi yerel en iyileme problemi olduğu için nümerik hesaplamayı ve farklı ilk durum seçeneklerinin değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle min-max tasarımı farklı ilk süzgeç katsayıları deneyerek tekrarlamalı olarak en iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörüne en yakın değeri elde etmeye çalışılmaktadır. Bu işlemler için uygulanan adımlar aşağıda verilmiştir.

- Darbe tekrarlama aralıklarının seçimi
- En iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörünün ilgililenen Doppler frekans aralığı için her bir frekans değerinde, bu frekans değeri için hesaplanan en iyilenmiş süzgeç katsayıları kullanılarak hesaplanması
- Min-max hesaplaması için gerekli ilk süzgeç katsayılarının düzgün dağılıma sahip katsayı değerleri arasından seçilmesi
- Belirlenen ilk süzgeç katsayıları ile min-max iyileştirme faktörünün hesaplanması ve her bir frekans için en iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörü ile karşılaştırılması
- Belirli sayıda tekrarlama ile her bir frekans için en iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörüne en yakın değeri veren süzgeç katsayılarının seçilmesi

İlgili adımlar kullanılarak hesaplanan min-max süzgecinin farklı ilk durumlar için çıktısı Şekil 4'de gösterilmiştir. Burada kullanılan ilk durum süzgeç katsayıları da Tablo I'de verilmiştir.

Tablo I. MIN-MAX TASARIMI İLK DURUM KATSAYI VEKTÖRLERİNİN ELEMANLARI VE ORTALAMA İYİLEŞTİRME FAKTÖRÜ

| İlk Durum Katsayı Vektörü (i.d.k.v)                             | IF (dB) |
|-----------------------------------------------------------------|---------|
| $\xi = [0.2179 \ 0.8988 \ 0.0405 \ 0.3525 \ 0.0588 \ 0.1236]$   | 59.25   |
| $\zeta = [0.5362 \ 0.4525 \ 0.2065 \ 0.6188 \ 0.0224 \ 0.2857]$ | 58.06   |
| $v = [0.2815 \ 0.5648 \ 0.5867 \ 0.1379 \ 0.3613 \ 0.3287]$     | 61.98   |
| $\iota = [0.4123 \ 0.4525 \ 0.4814 \ 0.1761 \ 0.4336 \ 0.4179]$ | 58.12   |



Şekil 4. Farklı İlk Süzgeç Katsayıları için Min-Max Süzgeç ve En İyilenmiş Süzgeç İyileştirme Faktörü Karşılaştırması

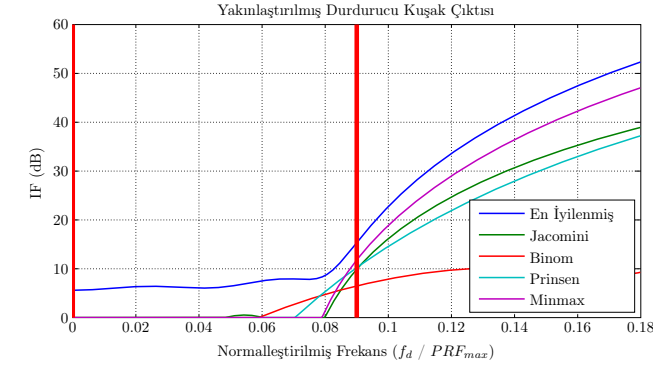
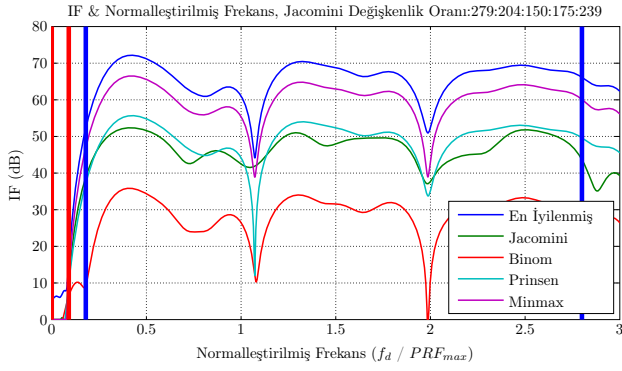
### III. NÜMERİK KARŞILAŞTIRMA

Bu kısımda sunulan tasarımların literatürden seçilen diğer çalışmalarla iyileştirme faktörü performansı olarak karşılaştırılması verilmiştir. Bu karşılaştırmalarda Jacomini [7] ve Zuyin'in [8] tasarımları referans olarak alınmış ve ek olarak Prinsen [4] ve Binom süzgeçleri ile de karşılaştırmalar verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda Jacomini ve Zuyin'in tasarımlarında kullanılan darbe tekrarlama aralığı, kargaşa ve frekans sınır değerleri kullanılmıştır.

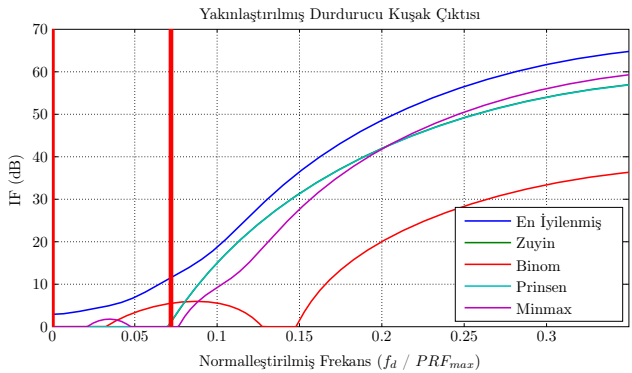
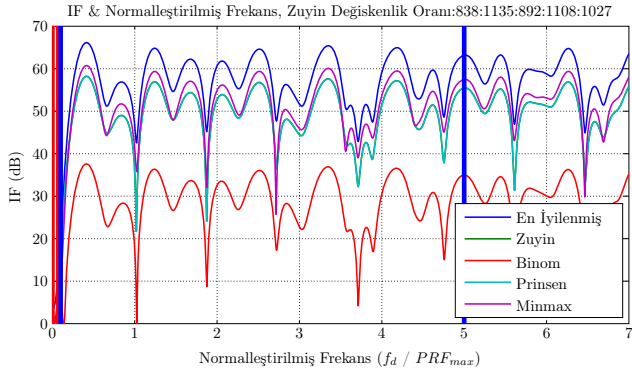
Jacomini'nin tasarımında, düzgün dağılımlı kargaşa modeli kullanılmıştır. Ağırlık faktörü yardımı ile geçirgen kuşaktaki salınımlar ve durdurucu kuşaktaki bastırma arasında ilişki oluşturulmuştur. Darbe tekrarlama aralığı değerleri  $[0.0, 0.279, 0.483, 0.633, 0.808, 1.047]$  olarak verilmiştir. Min-max tasarımı ile karşılaştırma yapılırken bu değerler değişiklik oranı olarak  $[279, 204, 150, 175, 230]$ 'ye çevrilmiştir.

Zuyin'in tasarımında, Gauss kargaşa modeli kullanılmıştır. Geçirgen kuşaktaki hatanın az olduğu  $[0.0, 0.838, 1.973, 2.865, 3.973, 5.000]$  darbe tekrarlama aralıkları seçilmiştir. Min-max karşılaştırma yapılırken bu değerler değişiklik oranı  $[838, 1135, 892, 1108, 1027]$ 'ye çevrilmiştir.

İyileştirme faktörü karşılaştırmaları ve süzgeç katsayıları Şekil 5, 6 ve Tablo II, III, IV, V'de verilmiştir. Bu karşılaştırmalarda elde edilen sonuçlar min-max tasarımı ile en iyilenmiş süzgece daha yakın iyileştirme faktörü değerleri elde edilebildiğini göstermiştir.



Şekil 5. Jacomini Süzgeç Tasarımının Min-max, Binom ve Prinsen Süzgeçleri ile İyileştirme Faktörü Karşılaştırılması



Şekil 6. Zuyin Süzgeç Tasarımının Min-max, Binom ve Prinsen Süzgeçleri ile İyileştirme Faktörü Karşılaştırılması

Tablo II. JACOMINI KARŞILAŞTIRMASI İÇİN SÜZGEÇ KATSAYILARI [7]

|                  | Normalleştirilmiş Süzgeç Katsayıları (DO: 279 204 150 175 239) |
|------------------|----------------------------------------------------------------|
| Jacomini         | 0.059, -0.332, 0.695, -0.534, 0.092, 0.023                     |
| Binom            | 0.063, -0.315, 0.629, -0.629, 0.315, -0.063                    |
| Prinsen          | 0.023, -0.206, 0.624, -0.694, 0.291, -0.037                    |
| Min-max          | -0.035, 0.238, -0.640, 0.675, -0.274, 0.036                    |
| Min-max i.d.k.v. | 0.156, -0.306, 0.536, 0.5401, -0.088, 0.543                    |

Tablo III. ZUYIN KARŞILAŞTIRMASI İÇİN SÜZGEÇ KATSAYILARI [8]

|                  | Normalleştirilmiş Süzgeç Katsayıları (DO: 838 1135 892 1108 1027) |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Zuyin            | 0.083, -0.309, 0.644, -0.635, 0.275, -0.056                       |
| Binom            | 0.063, -0.315, 0.629, -0.629, 0.315, -0.063                       |
| Prinsen          | 0.083, -0.309, 0.644, -0.635, 0.274, -0.056                       |
| Min-max          | -0.128, 0.383, -0.649, 0.588, -0.255, 0.060                       |
| Min-max i.d.k.v. | 0.569, -0.288, 0.476, -0.084, 0.251, 0.545                        |

Tablo IV. JACOMINI KARŞILAŞTIRMASI İYİLEŞTİRME FAKTÖRÜ DEĞERLERİ

|         | En İyilenmiş | Jacomini | Binom  | Prinsen | Minmax |
|---------|--------------|----------|--------|---------|--------|
| IF (dB) | 63.123       | 44.660   | 44.575 | 47.193  | 57.257 |

Tablo V. ZUYIN KARŞILAŞTIRMASI İYİLEŞTİRME FAKTÖRÜ DEĞERLERİ

|         | En İyilenmiş | Zuyin  | Binom  | Prinsen | Minmax |
|---------|--------------|--------|--------|---------|--------|
| IF (dB) | 56.887       | 48.701 | 49.525 | 50.375  | 54.297 |

## IV. SONUÇ

Bu çalışmada değişken darbe tekrarlama aralıklı MTI süzgeçleri için min-max tasarımı sunulmaktadır. Her bir frekans değeri için hesaplanan en iyilenmiş süzgeçlerin yerine tek bir süzgeç kullanımı ile en iyilenmiş süzgecin iyileştirme faktörüne en yakın değer elde edilmeye çalışılmıştır.

## KAYNAKÇA

- [1] M. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2001.
- [2] D. Schleher, *MTI and Pulsed Doppler Radar with MATLAB*. Artech House, 2010.
- [3] S. Gilon and A. Venetsanopoulos, "Design of MTI radar on the basis of detection probability," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. AES-15, no. 1, pp. 106–118, Jan. 1979.
- [4] P. Prinsen, "A class of high-pass digital MTI filters with nonuniform PRF," *Proc. IEEE*, vol. 61, no. 8, pp. 1147–1148, Aug. 1973.
- [5] —, "Elimination of blind velocities of MTI radar by modulating the interpulse period," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-9, no. 5, pp. 714–724, Sept. 1973.
- [6] J. Hsiao and F. Kretschmer Jr, "Design of a staggered-PRF MTI filter." DTIC Document, Tech. Rep., 1973.
- [7] O. Jacomini, "Weighting factor and transmission time optimization in video MTI radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-8, no. 4, pp. 517–527, July 1972.
- [8] W. Zuyin, "Optimal design of clutter rejection filters for MTI system," in *Radar, 2001 CIE International Conference on, Proceedings, 2001*, pp. 475–478.
- [9] "IEEE standard radar definitions," *IEEE Std 686-2008 (Revision of IEEE Std 686-1997)*, pp. c1–41, 21 2008.
- [10] J. Hsiao, "On the optimization of MTI clutter rejection," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. AES-10, no. 5, pp. 622–629, Sept. 1974.
- [11] M. İspir, "Design of moving target indication filters with non-uniform pulse repetition intervals," Master's thesis, Middle East Technical University, Jan. 2013.